Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
институт
Кафедра информатики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
__________ А.С. Кузнецов
«09» 06 2017 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

09.03.04 – Программная инженерия
код – наименование направления

Разработка программного комплекса адаптивного управления с идентификацией для распределенных объектов

тема

Руководитель	ассистент		09.06.17 подпись, дата	А.С. Михалев инициалы, фамилия
Выпускник			09.06.17 подпись, дата	В.Е. Кяшкин инициалы, фамилия
Консультант	профессор,	д.т.н	09.06.17 подпись, дата	А.И. Рубан инициалы, фамилия
Нормконтролер	доцент,	к.т.н	________ подпись, дата	О.А. Антамошкин инициалы, фамилия

Красноярск 2017

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
институт
Кафедра информатики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
____________А.С. Кузнецов
«18» 05 2017 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Студенту: Кяшкину Владиславу Евгеньевичу

Группа: КИ 13-18Б. Направление (специальность): 09.03.04 Программная инженерия.

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка программного комплекса адаптивного управления с идентификацией для распределенных объектов».

Утверждена приказом по университету № 2930 от 07 марта 2017 г.

Руководитель: А. С. Михалев, ассистент кафедры «Информатика»;

Консультант: А. И. Рубан, доктор технических наук, профессор кафедры «Информатика».

Исходные данные для ВКР: проектирование, разработка и реализация программного комплекса адаптивного управления с идентификацией для распределенных объектов с целью исследования алгоритма адаптивного управления с идентификацией при использовании разных типов моделей и различных алгоритмов идентификации.

Перечень основных разделов ВКР:

- ВВЕДЕНИЕ;

- Глава 1. Математические модели систем;

- Глава 2. Идентификация динамических моделей объектов;

- Глава 3. Адаптивное управление с идентификацией;

- Глава 4. Описание программной реализации;

- Глава 5. Численные исчисления;

- ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Перечень графического или иллюстративного материала с указанием основных чертежей, плакатов, слайдов: презентационные слайды PowerPoint.

Руководитель _______________ А. С. Михалев
(подпись)

Консультант _______________ А. И. Рубан
(подпись)

Задание принял к исполнению _______________ В. Е. Кяшкин
(подпись)

«18» мая 2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Описание исследуемой области. В настоящее время без задач управления в отраслях техники, механики, биологии, экономики и других отраслях не обойтись. Чаще бывает, что задача управления не несет в себе полную информацию, то есть какие – то факторы остаются неизвестными. Примером такой задачи можно назвать движение летательного аппарата в атмосфере. В реальной ситуации это движение происходит под действием большого числа разнообразных, мало контролируемых или непредсказуемых факторов, которые носят изменчивый, случайный характер. К данному числу можно отнести ошибки и возмущения в определении начальных условий, конструктивные особенности летательного аппарата, разброс характеристик аэродинамики, порыв ветра, вариации плотности атмосферы, магнитного и гравитационного поля Земли и другие факторы.

Не остаются постоянными также и другие параметры, так как кроме изменения характеристик внешних воздействий, есть еще и параметры управляемого объекта или самой системы в целом. При полете летательного аппарата изменяется его масса вследствие сгорания топлива, коэффициенты трения об окружающую среду также меняют свои значения. Обратная связь в системах автоматического управления с управлением по отклонению уменьшает влияние изменения параметров системы на работу. Но стоит сказать, что такое изменение приводит к расстройке системы в целом. При этом происходит отклонение управления от расчетного управления, а также ухудшаются показатели качества.

Источник неполноты информации в задачах управления может быть связан с наличием помех в канале наблюдения за движением системы. Важным источником неполноты информации является запаздывание. Оно вызвано конечностью самого времени, необходимого для проведения наблюдений и обработки результатов. Направленная на преобразование природы информация не всегда достаточна для того, чтобы с точностью утверждать о всех возможных результатах действия по ее реализации. В условиях неполной априорной информации о воздействиях из вне и о параметрах самого объекта управления задача управления усложняется. Усложнение условий решения задачи управления привела к созданию методов адаптивного управления. В адаптивных системах обработки информации и управления происходит приспособление к изменяющимся условиям и к неизвестным характеристикам объекта. Сейчас в теории адаптивных систем все больше заинтересованы в развитии методов, направленных на улучшение качества систем процесса их функционирования за счет изменения алгоритмов управления.

Актуальность. В последнее время в связи с предъявлением все более высоких требований к процессам управления в различных областях техники задача построения адекватных моделей стала исключительно важной, поскольку без нее нельзя обеспечить качество управления системы в целом. Нельзя построить адекватную модель только на основе изучения одних физических процессов в системе. Поэтому для построения моделей используются как теоретические, так и экспериментальные методы. Накопленный опыт проектирования различных технических систем старательно пытается свидетельствовать об этом. Модель, сформированная таким образом, как правило, может значительно отличаться от реальной системы, что приводит к снижению качества самого управления. Необходимость построения адекватных моделей и определила название выпускной квалификационной работы.

Цель работы. Целью выпускной квалификационной работы является проектирование, разработка и реализация программного комплекса адаптивного управления с идентификацией для распределенных объектов с целью исследования алгоритма адаптивного управления с идентификацией при использовании разных типов моделей.

Для достижения поставленной цели в работе потребовалось решить следующие **основные задачи:**

1. Проектирование интерфейса программного комплекса адаптивного управления;
2. Программная реализация алгоритма адаптивного управления с идентификацией;
3. Программная реализация алгоритма адаптивного управления с чистым запаздыванием;
4. Исследование алгоритма адаптивного управления с идентификацией на различных входных объектах;
5. Определение оптимального выхода объекта, сравнимого с траекторией желаемого выхода объекта, заданного пользователем.

Методы исследований, используемые в работе, основываются на методах теории вероятности и математической статистики, теории идентификации и управления.

При исследовании алгоритмов применялся разработанный программный комплекс адаптивного управления с идентификацией.

Публикации по теме работы. По теме выпускной квалификационной работы опубликована 1 работа. Данная статья опубликована в научно-техническом журнале, также зарегистрирована в наукометрической базе РИНЦ (Российский индекс научного цитирования).

Объём и структура работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем выпускной квалификационной работы 52 страницы, в том числе 47 страниц основного текста, включая библиографический список из 9 источников. Иллюстративный материал представлен на 20 рисунках и 2 – х таблицах.

Глава 1. Математические модели систем

Проектированию сложных, высококачественных алгоритмов управления предшествует построение математических моделей объектов управления, позволяющая с той или иной полнотой предсказывать изменение состояния объекта при приложении к нему управляющих воздействий. Выбор модели объекта является важным этапом при решении задачи адаптивного управления с идентификацией. От качества прогноза моделью выхода объекта во многом зависит качество управления.

Математическая модель – это приближенное описание изучаемого объекта, выраженное с помощью математической символики**.** Модель как изображение существенных сторон реальной системы, в удобной форме отражает информацию о системе. Другими словами, математическая модель – это оператор, характеризующий поведение реальной системы.

1.1 Классификация моделей объектов управления

Существуют разные типы и классы моделей. Так как классификация моделей характеризует только отдельные признаки каждой модели, то нельзя с уверенностью говорить о том, что она отражает все свойства используемых моделей.

Основные типы моделей:

- физические и математические;
- одномерные и многомерные;
- статические и динамические;
- детерминированные и стохастические;
- линейные и нелинейные;
- дискретные и непрерывные;
- стационарные и нестационарные;
- сосредоточенные и распределенные;

- характеристики типа «вход - выход» и описание в пространстве состояний;
- структурированные и агрегированные;
- параметрические и непараметрические.

Физические модели – такие модели, в которых свойства реального объекта отожествляются характеристиками вещественного объекта той же или аналогичной природы. Математические модели – это те модели, в которых для описания характеристик объекта пользуются математическими конструкциями.

Объекты называются одномерными, если они имеют один вход и один выход. Многомерные объекты имеют несколько входов и несколько выходов.

Выходное воздействие динамического объекта зависит не только от входного воздействия в текущий момент времени, но и от предыдущих значений входа. Из этого такое и названия такого объекта. Он обладает инерционностью (памятью). Математические модели динамических объектов задают поведение во времени.

Реакция статического объекта на входное воздействие не зависит от предыстории, от прошлого поведения системы, а также от предыдущих значений входа. Такие системы обладают мгновенной реакцией на входное воздействие. Статические модели описывают процессы, не изменяющиеся во времени, то есть поведение объекта в установленных режимах.

Детерминированный объект – выходное воздействие такого объекта однозначно определяется структурой объекта и входными воздействиями и не никак не зависит от неконтролируемых случайных факторов. В реальных условиях наблюдаемые выходные сигналы меняются не только под воздействием наблюдаемых входов, но и из-за многочисленных ненаблюдаемых случайных помех. Если такие помехи малы или вообще отсутствуют, то такую систему считают детерминированной. Стохастическая система – система, в которой случайные помехи оказывают существенное влияние на выходные переменные. Такая вероятностная модель отражает воздействие случайных факторов, поэтому между входными и выходными переменными существует не однозначная функциональная зависимость, а вероятностная. Также принято переменные состояния стохастического объекта оценивать в терминах математического ожидания, а входные воздействия - вероятностными законами распределения.

Для линейного объекта справедлив принцип суперпозиции, т.е. реакция объекта на линейную комбинацию (суперпозицию) двух входных воздействий равна этой же самой комбинации реакций данного объекта на каждое из воздействий:

$$f\big(\alpha u_1(t) + \beta u_2(t)\big) = \alpha f\big(u_1(t)\big) + \beta f\big(u_2(t)\big) \tag{1.1}$$

$u_1(t)$ и $u_2(t)$ - входные воздействия;

α и β - произвольные коэффициенты.

В противоположном случае объект считается нелинейным.

Объект можно называть непрерывным, если состояния его входных и выходных воздействий можно изменить или измерить непрерывно в течение определенного промежутка времени.

Дискретный объект – объект, чье состояние выходов и входов определено лишь в дискретные моменты времени. Описание дискретных систем происходит через решетчатые функции, являющиеся аналогами непрерывных функций, и разностные уравнения, являющиеся аналогами дифференциальных уравнений.

Объект называется стационарным, в случае если его реакция на одинаковые входные воздействия не будет зависеть от времени приложения этих воздействий, то есть параметры объекта не зависят от времени. В противном случае объект не будет стационарен.

Объект с сосредоточенными параметрами называется сосредоточенным, если его входные и выходные величины зависят только от времени (зависимость от одной переменной). Такие модели объектов содержат одну или несколько производных по времени от переменных состояния и выглядят как обыкновенные дифференциальные уравнения. Математическая модель переходных процессов в объекте наряду с дифференциальным уравнением содержит еще дополнительные условия однозначности – начальные условия.

Выходная величина объекта с распределенными параметрами зависит от нескольких переменных – от времени и пространственных координат. Такая ситуация обычно бывает, когда исследуемая характеристика объекта, например, температура, концентрация вещества и тому подобное, распределена в некотором объеме. В данном случае математическая модель объекта содержит частные производные и описывается динамикой процесса во времени, и распределенностью характеристик в пространстве. Математическая модель процессов в данном объекте включает дифференциальное уравнение в частных производных, начальные условия и граничные условия. Ярким примером такой модели может быть волновое уравнение, модель диффузии или теплопроводности:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = a\frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} + f\big(x,t,u(x,t)\big), \tag{1.2}$$

$Q\,(x,t)$ – функция состояния одномерного объекта с распределенными параметрами;

$x\ \in\ [x_0, x_1]$;

a и f – коэффициент и функция соответственно.

Характеристики типа «вход - выход» являются определенные операторы, которые связывают поведение выходной величины объекта со входной, например, передаточная, переходная, весовая функции.

Модели координат состояние – это пространства состояний, описывающие динамическое поведение системы с n степенями свободы, характеризующейся n координатами. Такими координатами могут являться значения функции и ее n-1 производных в произвольный момент времени. Они составляют n-мерный вектор, который полностью определяет состояние системы в каждый из моментов времени в n-мерном пространстве состояний или фазовом пространстве. Координаты вектора состояния, в отличие от векторов входных и выходных величин, в случае общего назначения, являются абстрактными математическими характеристиками, природа которых физически несущественна. Координаты вектора состояния, структура и значения коэффициентов уравнений состояний зависят от выбора базиса в фазовом пространстве. Конкретный вид уравнений в пространстве состояний показан ниже для линейных и нелинейных систем.

Структурированная модель – это представление математической модели всей системы как совокупности относительно более простых моделей отдельных элементов и блоков объекта, соединенных между собой связями. Такая модель характеризует как физические, так и технические аспекты построения системы управления и может исследовать процессы, происходящие как во всей системе в целом, так и в каждом из ее элементов. Таким образом, можно сказать, что структурированная модель системы управления представляет совокупность ряда взаимосвязанных математических моделей отдельных звеньев. Последовательно исключая из рассмотрения все внутренние переменные, являющиеся входными или выходными сигналами внутренних звеньев, в данной модели можно найти дифференциальное уравнение, описывающее взаимосвязь входной и выходной величин системы и являющееся агрегированной моделью. Агрегированная модель – модель, описывающая функциональные взаимосвязи между входными и выходными величинами без учета какой-либо внутренней структуры и взаимосвязей в системе.

Параметрические модели описываются в заданной явной форме аналитическими зависимостями, содержащими параметры, которые подлежат идентификации. Данные зависимости представляют собой параметрические модели конечной размерности, такие, как дифференциальные уравнения определенного порядка, модели в пространстве состояний. Параметрами являются численные значения величин, определяющих выход модели (значения коэффициентов обыкновенных дифференциальных уравнений, начальных условий, коэффициентов передаточных функций). Параметрической идентификацией (ее методами) определяются неизвестные коэффициенты уравнения объекта или передаточной функции.

Непараметрические модели ограничены описанием преобразований сигналов пространства входов в элементы пространства выходов. В данном случае модель объекта определена оператором преобразования функций входных сигналов в функции выходных величин. Непараметрические модели представляют из себя весовые функции, передаточные функции, (при заранее не заданном числе коэффициентов), корреляционные функции, ряды Вольтера, спектральные плотности. Для модели в виде весовой функции, связь между входными и выходными сигналами для линейных объектов задается с помощью интеграла свертки (интеграла Дюамеля):

$$y(t) = \int_0^\infty w(\tau)u(t-\tau)d\tau = \int_0^\infty u(\tau)w(t-\tau)d\tau \tag{1.3}$$

$w(t)$ – импульсная переходная (весовая) функция объекта, являющаяся непараметрической моделью линейного динамического объекта.

Методами непараметрической идентификации пользуются для определения временных или частотных характеристик объектов. По полученным характеристикам в дальнейшем можно определить передаточную функцию или уравнения объекта. Параметрические модели иногда приводят к большим ошибкам, если порядок модели не будет соответствовать порядку объекта. Преимущество же непараметрических моделей состоит в том, что они не требуют явного знания порядка объекта. Но в данном случае описание является бесконечномерным.

1.2 Статические объекты

Статической характеристикой объекта является зависимость между входными и выходными сигналами в установившемся режиме. Аналитически уравнение модели статического объекта будет иметь вид нелинейной функции многих переменных:

$$y = f\,(u). \tag{1.4}$$

Во многом, на практике, если общую нелинейную функцию (1.4) удается параметризовать некоторым вектором a, тогда эта зависимость принимает вид

$$y = f\,(u, a), \tag{1.5}$$

тогда задача идентификации сводится к определению неизвестных параметров a. Частным случаем параметрических моделей [1] являются такие модели, линейные относительно оцениваемых параметров:

$$y = a_0 + \sum_i a_i f_i(u) \tag{1.6}$$

$f_i\,(u) = f_i\,(u_1, u_2, \ldots, u_n)$ – это заданная система векторных линейно независимых функций.

Моделью статического линейного многомерного объекта с n входами и m выходами является система линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} y_1 = a_{10} + a_{11}u_1 + a_{12}u_2 + \cdots + a_{1n}u_n \\ \qquad \cdots \\ y_m = a_{m0} + a_{m1}u_1 + a_{m2}u_2 + \ldots + a_{mn}u_n \end{cases} \tag{1.7}$$

a_{ij} – являются неизвестными параметрами модели, подлежащие определению.

В векторной форме система (1.7) имеет вид

$$y = a_0 + Au \quad y = a_0 + Au, \tag{1.8}$$

u и y – это вектора входных и выходных воздействий;

a_0 и A – соответственно вектор и матрица коэффициентов модели, подлежащие идентификации.

Для моделей статических объектов можно применять разложения по ортогональным семействам функций на заданном интервале наблюдения, где в качестве ортогональных полиномов могут применяться полиномы Фурье, Чебышева, Лагерра и др. [1, 2].

1.3 Динамические объекты

Динамические объекты описываются относительно некоторых координат, характеризующих их состояние, следующими уравнениями: дифференциальными и разностными [3, 4]:

а) Обыкновенные дифференциальные уравнения n-го порядка

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \ldots + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \ldots + b_0 u(t), \tag{1.9}$$

a_i , b_j , $i = 0,1,...n$; $j = 0,1,...m$ – параметры модели, подлежащие

идентификации.

Для большинства реальных физических, которые реализуемые, систем управления выполняется условие $m \le n$.

Чтобы описать конкретный процесс перехода к дифференциальному уравнению (1.9) можно также добавить некоторые условия однозначности –

$$\frac{d_i y(0)}{-1.\, dt^i}, i = 0,1, \ldots n$$

начальные условия, задающие значения выходной величины и ее $n - 1$ производных в нулевой момент времени.

б) Передаточные функции, если к дифференциальному уравнению (1.9) задать нулевые начальные условия, то при применении преобразования Лапласа получают передаточную функцию линейного объекта в следующем виде:

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{\sum_{i=0}^{m} b_i p^i}{\sum_{i=0}^{n} a_i p^i}, \tag{1.10}$$

p – комплексная переменная, параметр преобразования Лапласа.

При описании объектов, обладающих транспортным запаздыванием τ, в общих случаях, дифференциальное уравнение (1.9) принимает следующий вид:

$$a_n \frac{d^n y(t-\tau)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t-\tau)}{dt^{n-1}} + \ldots + a_0 y(t-\tau) =$$
$$= b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \ldots + b_0 u(t), \tag{1.11}$$

а передаточная функция, в свою очередь, определяется выражением:

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{\sum_{i=0}^{m} b_i p^i}{\sum_{i=0}^{n} a_i p^i} \cdot e^{-p\tau}. \tag{1.12}$$

в) Уравнения в пространстве состояний

Динамические процессы, наряду с дифференциальным уравнением n-го порядка (1.9), можно в дополнении описать системой n обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{dy_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} y_j + \sum_{j=1}^{m} b_{ij} u_j, \quad i = 1,2,\ldots n. \tag{1.13}$$

Представим модель в пространстве состояний в следующей матричной форме, вводя в описание вектор состояний системы:

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad x(t_0) = x_0,\ t \geq t_0$$
$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t), \tag{1.14}$$

где $x(t) = [\, x_1(t) \quad x_2(t) \quad \ldots \quad x_n(t)]^T$ – вектор состояний размерностью n;

$u(t) = [u_1(t) \; u_2(t) \quad \ldots \quad u_m(t)]$ – вектор входов размерностью m;

$y(t) = [\, y_1(t) \; y_2(t) \; \ldots \; y_p(t)]^T$ – вектор выходов размерностью p;

$A(t)$ – матрица динамики системы размерностью $[n \times n]$;

$B(t)$ – распределительная матрица размерностью $[n \times m]$;

$C(t)$ – выходная матрица (матрица наблюдений) размерностью $[p \times n]$;

$D(t)$ – матрица «вход-выход» размерностью $[p \times m]$.

Одной из самых распространенных форм математической модели линейной динамической системы в пространстве состояний считается система двух векторных уравнений (1.14). Первое уравнение является дифференциальным. Оно задает поведение системы во времени. Второе же уравнение алгебраическое. Оно устанавливает связь выходной величины с вектором состояний и со входом.

С учетом воздействия внешней среды, при наличии входной аддитивной помехи $v(t)$ и погрешностей измерения $\eta(t)$ базовая формулировка модели имеет вид:

$$\begin{aligned} &\frac{dx}{dt} = A(t)x(t) + B(t)u(t) + V(t)v(t); \quad x(t_0) = x_0;\; t \ge t_0; \\ &y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) + \eta(t), \end{aligned} \tag{1.15}$$

где также присутствуют (помимо рассмотренных ранее обозначений):

$v(t)$ – k-мерный вектор случайных воздействий (помех);

$V(t)$ – матрица размерностью $[n \times k]$, описывающая канал прохождения помехи;

$\eta(t)$ – p-мерный вектор шумов измерения.

Воздействия $v(t)$ и $\eta(t)$ обычно полагаются гауссовскими случайными процессами в виде белого шума.

При условии, что если матрицы $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ не зависят от времени t, то система – стационарная.

Если часть входного воздействия $u(t)$ пропорционально поступает на выход системы, в условии $D(t) \neq 0$, такая система – несобственная. В динамических системах практически всегда наблюдается $D(t) = 0$. Такая система называется обычно собственной или строго реализуемой.

г) Обыкновенные разностные уравнения [5]

Универсальной характеристикой для дискретных моделей является разностное уравнение n-го порядка, где используется понятие разности как аналога понятию производной для непрерывных моделей:

$$a_0 y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) = \ldots = b_0 u(k) + \ldots$$

$$\ldots + b_1 u(k-.1) + \ldots + b_m u(k-m), \tag{1.16}$$

где $y(k), u(k)$ – значения выходной и входной величин в k-ый момент времени $k = 1, 2, \ldots$.

1.4 Заключение

Данная работа посвящена вопросу управления для класса динамических объектов. Динамический объект – это объект, выход которого зависит не только от текущего значения входных сигналов, но и от их значений в предыдущие моменты времени. Динамические модели объектов наиболее адекватно отражают самые существенные и значимые характеристики большинства современных реальных производственно-технических, экономических и др. объектов [6].

В данной работе рассматриваются только линейные динамические модели. Для описания этих объектов будут применяться разностные уравнения.

Глава 2. Идентификация динамических моделей объектов

Процесс построения моделей объектов разной природы называется идентификацией. Задача идентификации в общей постановке формулируется следующим образом: по реализации входных и выходных сигналов определить оператор F, устанавливающий математическую связь между входами и выходами объекта. Оператор F, в таком случае, отражает структуру и параметры объекта идентификации.

Исследователи, для синтеза системы управления, редко располагают полной априорной информацией об объекте и окружающей его среде. Но даже если известны системы уравнения, описывающие поведение системы, то часто может оказываться, что нет данных о величине отдельных параметров и при этом нередко имеющиеся модели слишком сложны. Далее оказывается, что принятая при проектировании модель существенно отличается от реального объекта, что значительно уменьшает эффективность разработанной системы управления. В связи с такими обстоятельствами актуальной становится возможность уточнения модели на основе наблюдений, полученных в условиях нормального функционирования объекта.

Задачу идентификации можно сформулировать следующим образом: по результатам наблюдений над входными и выходными переменными системы должна быть построена оптимальная в некотором смысле модель, то есть формализованное представление этой системы.

В зависимости от априорной информации различают задачи идентификации в узком и широком смысле. В узком смысле задача идентификации – это оценивание параметров и состояния системы по результатам наблюдений над входными и выходными переменными, полученными в условиях функционирования объекта. В этом случае известна структура системы и задан класс моделей, к которому данный объект относится (параметрическая идентификация). При условии, если априорных данных мало или их вовсе нет, то решение задачи идентификации связано и с определением структуры оператора F (а значит и исследуемого объекта), и с оценкой параметров этой структуры. В данном случае говорят об идентификации в широком смысле (непараметрическая идентификация). К таким задачам относятся: выбор структуры системы, оценивание степени и формы влияния входных переменных на выходные, выбор информативных переменных и так далее.

При построении структуры модели используется априорная информация об объекте. Для каждого из классов объектов формируются банки структур с сопутствующей информацией.

Перед каждым использованием моделей для решения конкретных задач (прогнозирования, фильтрации, управления) по свежим экспериментальным данным корректируются параметры моделей.

Важным режимом идентификации параметров моделей является адаптивный режим. При этом непрерывно по мере поступления измерений входов и выходов объекта перестраиваются параметры. Для данного режима идентификации алгоритмам придают особый вид.

Особые подходы сформированы к построению структуры и подстройке параметров моделей стохастических объектов. Влиянием помех в объекте уже нельзя пренебречь и становится необходимостью брать за основу не только привычные детерминированные модели, но также стараться строить стохастические модели. Стохастическая часть в них, в основном, строится на невязках выходов объекта и модели [7].

В данной работе в качестве описания динамической системы используются линейные разностные уравнения, поэтому будем считать, что структура объекта определена и особое внимание уделяется задаче подбора неизвестных параметров.

2.1 Метод наименьших квадратов

При решении практических задач идентификации линейных систем широко применяются методы идентификации. Базовым подходом к определению параметров самой модели остается метод наименьших квадратов. Суть данного метода заключается в выборе неизвестных параметров модели таким образом, чтобы минимизировать взвешенную сумму квадратов отклонений выхода объекта и модели.

Линейные модели в общем виде записываются следующим образом:

$$y\big(k\big|\alpha(t)\big) = \alpha^T(t)\varphi(k) = \varphi^T(k)\alpha(t)$$

где $\alpha(t) = [\alpha_0(t), \alpha_1(t), \dots, \alpha_n(t), \alpha_{n+1}(t), \dots, \alpha_{n+m}(t)]^T,$

$$\varphi(k) = [1, x(k-1), x(k-2), \dots, x(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m)]^T.$$

Критерий наименьших квадратов имеет вид

$$\sum_{i=1}^{t} p_i^{-1}[x(i) - \varphi^T(i)\alpha(t)]^2 = \min_{\alpha(t)}.$$

Из условия экстремума функционала определяются параметры модели по методу наименьших квадратов, откуда следует соотношение, определяемое систему нормальных уравнений

$$\left(\sum_{i=1}^{t} p_i^{-1}\,\varphi^T(i)\varphi(i)\right)\alpha(t) = \sum_{i=1}^{t} p_i^{-1}\varphi(i)x(i).$$

И так, если модель линейна относительно неизвестных параметров, то решение может быть получено аналитически, при условии, что указанная обратная матрица существует

$$\alpha(t) = \left(\sum_{i=1}^{t} p_i^{-1}\,\varphi^T(i)\varphi(i)\right)^{-1} \sum_{i=1}^{t} p_i^{-1}\varphi(i)x(i).$$

Полученные выражения представляют в явной форме оценку параметров модели методом наименьших квадратов на основе обработки результатов измерений по полной выборке, когда сначала весь объем исходных экспериментальных данных собирается, а после производится ретроспективная процедура идентификации.

Применение метода наименьших квадратов для решения задачи идентификации обладает существенными недостатками:

- есть необходимость проведение сложных вычислительных операций (например, выполнение процедуры обращения многомерных матриц), требующих большого объема оперативной памяти ЭВМ.
- по мере их поступления невозможно оперативно обрабатывать исходные данные.

В сумме этих недостатков получили широкое применение рекуррентные алгоритмы.

2.1.1 Рекуррентный метод наименьших квадратов

Сущность рекуррентных процедур состоит в следующем: происходит получение оценки вектора параметров $\alpha(t)$ в момент времени t путем корректировки оценки на предыдущем шаге. Построение текущей оценки производится на основании t наблюдений и результатов вычисления оценки $\alpha(t-1)$ на предыдущим момент времени.

Рекуррентный метод наименьших квадратов имеет следующий вид:

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + \gamma(t)[x(t) - \varphi^T(t)\alpha(t-1)],$$

$$\gamma(t) = \frac{\Gamma(t-1)\varphi(t)}{p(t) + \varphi^T(t)\Gamma(t-1)\varphi(t)},$$

$$\Gamma(t) = [E - \gamma(t)\varphi^T(t)]\Gamma(t-1),$$

E – единичная матрица.

Начальные значения $\alpha(t_0), \Gamma(t_0)$ данной рекуррентной процедуры получаются из решения системы линейных алгебраических уравнений критерия наименьших квадратов для $t = t_0$:

$$\alpha(t_0) = \left(\sum_{i=1}^{t_0} p_i^{-1}\, \varphi^T(i)\varphi(i)\right)^{-1} \sum_{i=1}^{t_0} p_i^{-1}\varphi(i)x(i),$$

$$\Gamma(t_0) = \left(\sum_{i=1}^{t_0} p_i^{-1}\, \varphi^T(i)\varphi(i)\right)^{-1}.$$

2.1.2 Рекуррентный метод наименьших квадратов с забыванием информации

С ростом объема измерений оценки, полученные по рекуррентному методу наименьших квадратов стремятся к постоянным величинам. Ослабевает влияние текущих измерений с ростом n на оценки параметров, то есть становится меньше и при $n \to \infty$ вовсе исчезает обратная связь к измерениям. Для отслеживания дрейфующих (слабо меняющихся) параметров в критерий вводятся дополнительные веса, которые убывают для более старых измерений. Примером таких весовых коэффициентов является убывающая последовательность $\lambda^{t-i}, i = t, t-1, \dots, 0 < \lambda < 1$ (в данном случае λ часто называют *фактором забывания*).

На основе этого был получен рекуррентный метод наименьших квадратов с экспоненциальным забыванием информации. Он имеет следующий вид:

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + \gamma(t)[x(t) - \varphi^T(t)\alpha(t-1)],$$

$$\gamma(t) = \frac{\Gamma(t-1)\varphi(t)}{p(t)\lambda + \varphi^T(t)\Gamma(t-1)\varphi(t)},$$

$$\Gamma(t) = [E - \gamma(t)\varphi^T(t)]\Gamma(t-1)\lambda^{-1},$$

Начальные значения $\alpha(t_0), \Gamma(t_0)$ этой рекуррентной процедуры получаются из решения системы линейных алгебраических уравнений критерия наименьших квадратов для $t = t_0$:

$$\alpha(t_0) = \left(\sum_{i=1}^{t_0} p_i^{-1}\, \lambda^{t_0-i}\varphi^T(i)\varphi(i)\right)^{-1} \sum_{i=1}^{t_0} p_i^{-1}\lambda^{t_0-i}\varphi(i)x(i),$$

$$\Gamma(t_0) = \left(\sum_{i=1}^{t_0} p_i^{-1}\lambda^{t_0-i}\, \varphi^T(i)\varphi(i)\right)^{-1}.$$

2.2 Простейший адаптивный алгоритм

Простейший адаптивный алгоритм является одним из первых применяемых в адаптации алгоритмов. Алгоритм очень простой и обладает неплохими свойствами, особенно при работе системы управления в окрестности стабилизируемых значений.

Основным требованием при идентификации является условие равенства выходов объекта и модели в момент времени t:

$$x(t) = y\big(t\big|\alpha(t)\big) = \varphi^T(t)\alpha(t).$$

На предыдущем такте $(t-1)$ параметры $\alpha(t-1)$ удовлетворяют такому же линейному уравнению

$$x(t-1) = \varphi^T(t-1)\alpha(t-1).$$

Каждое уравнение в пространстве параметров представляет собой плоскость (линию при двух параметрах). В момент времени t происходит переход параметров из точки $\alpha(t-1)$ плоскости $x(t-1) = \varphi^T(t-1)\alpha(t-1)$ на плоскость $x(t) = \varphi^T(t)\alpha(t)$. Чтобы такой переход был единственным, накладывается также дополнительное условие (минимум квадрата нормы отклонения параметров):

$$\|\alpha(t) - \alpha(t-1)\|^2 = \min_{\alpha(t)}.$$

Решение этой задачи получается с использованием операции псевдообращения вектора строки $\varphi^T(t)$:

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + \big(\varphi^T(t)\big)^+[x(t) - \varphi^T(t)\alpha(t-1)] \equiv$$

$$\equiv \alpha(t-1) + \frac{\varphi(t)[x(t) - \varphi^T(t)\alpha(t-1)]}{\varphi^T(t)\varphi(t)}, t = 1,2, \dots$$

2.2.1 Простейший адаптивный алгоритм с памятью

Одной из модификаций простейшего адаптивного алгоритма является использовании при расчете параметров $\alpha(t)$ нескольких последних (по времени) равенств выходов объекта и модели:

$$x(k) = y\big(k\big|\alpha(t)\big) = \varphi^T(k)\alpha(t), k = t, t-1, \dots, t-p+1, 1 \le p.$$

С учетом данной схемы простейший адаптивный алгоритм в матричной форме примет следующий вид:

$$\Phi(t)\big(\alpha(t) - \alpha(t-1)\big) = X(t) - \Phi(t)\alpha(t-1),$$

$$\text{где} \quad \Phi(t) = \begin{pmatrix} \varphi^T(t) \\ \dots \\ \varphi^T(t-p+1) \end{pmatrix},$$

$$X(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ \dots \\ x(t-p+1) \end{pmatrix}.$$

Единственное решение данной задачи на основе использования операции псевдообращения матриц имеет следующий вид

$$\alpha(t) - \alpha(t-1) = \Phi^+(t)[X(t) - \Phi(t)\alpha(t-1)],$$

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + \Phi^+(t)[X(t) - \Phi(t)\alpha(t-1)], t = 1,2, \dots$$

2.3 Методы нейтрализации помех

Дополнительная помеха в оценках параметров асимптотически не убывает и для ее нейтрализации необходимо применять дополнительно сглаживание получаемых оценок a1, a2, …, a_n.

2.3.1 Усреднение по всем измерениям

$$a(t) = \alpha(t-1) + t^{-1}\big(a(t) - a(t-1)\big), t = 1,2, \dots . \quad (2.1)$$

2.3.2 Экспоненциальное забывание информации

Усреднение можно провести с учетом экспоненциального забывания информации:

$$\alpha(t) = \left(\sum_{i=1}^{t} \lambda^{t-i}\right)^{-1} \sum_{i=1}^{t} \lambda^{t-i} a(i) = a(t-1) + \delta_t^{-1}(a(t) - a(t-1)), \quad (2.2)$$

$$0 < \lambda < 1, \text{например}, 0.9 \le \lambda \le 0.995;$$

2.3.3 Усреднение методом скользящего среднего

Сглаживание получаемых оценок происходит за счет усреднения не по всем измерениям, а по k последним: (k – количество усредняемых значений)

$$a(t) = k^{-1} \sum_{i=t+1-k}^{t} a(i) = a(t-1) + k^{-1}\big(a(t) - a(t-k)\big), \quad (2.3)$$

$$t = k+1, k+2, \dots \ .$$

Алгоритмы (2.2) и (2.3) применяют при подстройке дрейфующих параметров объекта.

Глава 3. Адаптивное управление с идентификацией

В общесистемном плане адаптация – это способность системы обнаруживать целенаправленное приспосабливающееся поведение в сложившихся средах, а также сам процесс такого приспособления [8].

Наряду с данным понятием широкое распространение получило также следующее понятие – адаптивное управление. Система, в которой происходит в результате изменения параметров внешней и внутренней среды подстройка системы в целом называется, как раз, адаптивным управлением. В результате изменений параметров происходит обеспечение функционирования объекта управления в целом.

Адаптивной считают такую систему, которая может приспосабливаться к изменяющимся условиям — внутренним и внешним.

Во всех определениях адаптации и адаптивного управления присутствует свойство системы приспосабливаться к изменяющимся условиям внешней среды. Это свойство называется адаптивностью.

Адаптивное управление – это управление с обратной связью, имеющее блок учета внешних факторов, которые анализируются до того, как получен результат деятельности системы. При этом блок управления получает информацию об изменении значения фактора одновременно с управляемым объектом или, при наличии прогноза, а может даже раньше, и принимаются меры по нейтрализации его влияния, либо по согласованию мер для увеличения его положительного эффекта.

Для восполнения недостающей априорной информации при адаптивном подходе активно используется текущая информация. Данный подход применяется и в тех случаях, когда применение другого подхода в теории возможно, но сопряжено с большой работой по предварительному определению функций распределения. Если не ясно заранее, с каким процессом мы имеем дело, с случайным или детерминированным, и неизвестны их характеристики, то единственное возможное решение связано с обучением и адаптацией в процессе экспериментирования, то есть с использованием адаптивного подхода.

В адаптивных системах обработки информации и управления происходит приспособление к меняющимся условиям и неизвестным характеристикам объекта. Адаптивные устройства управления строятся на основе двух принципов. Первый принцип на основе некоторых критериев (например, теории устойчивости, теории инвариантности, критериев рациональности) выбирается структура устройства управления с точностью до настраиваемых параметров. Блок адаптации на основе свежей информации о входах и выходах объекта перестраивает параметры в темпе с объектом управления. Общий вид блоков идентификации двух принципов показан на рисунке 3.1:

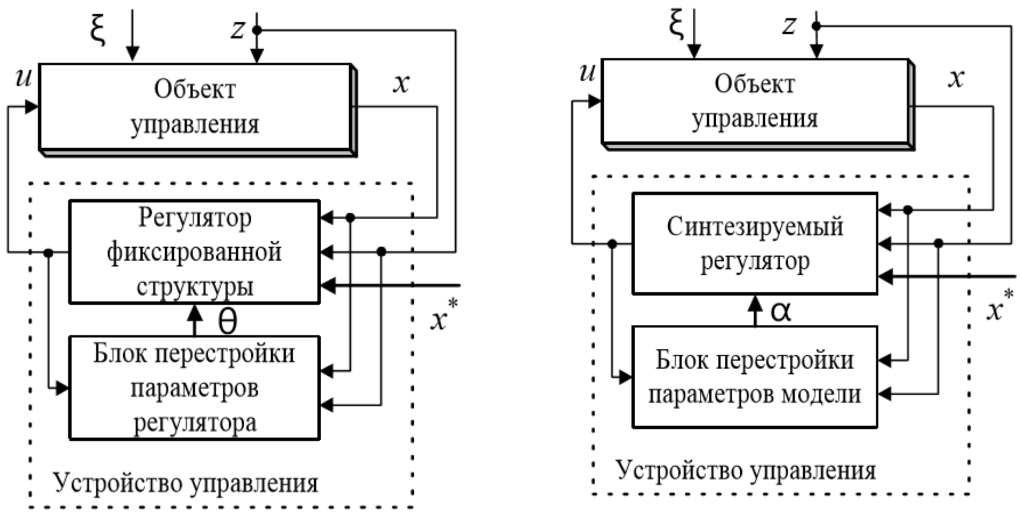

Рисунок 3.1 – Блоки идентификации

Второй же подход основан на использовании модели объекта. Структура модели задается с точностью до отдельных параметров. На ее базе из критериев оптимальности синтезируется управление, которое, конечно, зависит от параметров модели. Параметры модели перестраиваются блоком идентификации непрерывно по мере поступления новой информации об объекте (рисунок 3.1). Для написания алгоритма адаптивного управления с идентификацией был выбран именно этот подход. При его реализации используем ранее рассмотренные алгоритмы адаптивной перестройки параметров статических и динамических моделей.

В ходе реализации адаптивной системы с идентификацией (далее АСИ) выяснилось, что одни и те же алгоритмы работы АСИ можно применить для широкого спектра объектов различной природы. Это обстоятельство позволяет решать задачу автоматизированного проектирования математического обеспечения АСИ.

3.1 Постановка задачи адаптивного управления

Рассмотрим адаптивную систему с идентификацией (АСИ). Синтезируем алгоритм расчета управления (алгоритм работы устройства управления) $u(t)$ в каждый текущий момент времени t. Исходными экспериментальными данными о входе и выходе объекта являются:

$$x(t), x(t-1), u(t-1), x(t-2), u(t-2)$$

Необходимо рассчитать управляющее воздействие $u(t)$, которое обеспечивает достижение следующей цели: наименьшего уклонения выхода системы x от заданной траектории x^* в каждый текущий момент времени.

Будем считать, что поведение объекта в динамическом режиме описывается разностным уравнением:

$$x(t) = f(x(t-1), u(t-1), a) + h(t), t = 1,2, \dots \tag{3.1}$$

$f(*)$ – известная функция, a – неизвестные параметры, $h(t)$ – окрашенный или белый шум (для более понятного объяснения будем и дальше называть шум просто белым).

Обозначим через $y(k|\alpha(t))$ выход модели в момент времени k при значении вектора параметров $\alpha(t)$, вычисленных в момент времени t:

$$y\big(k\big|\alpha(t)\big) = f\big(x(k-1), u(k-1), \alpha(t)\big) \tag{3.2}$$

Эта модель используется как для идентификации параметров, так и для расчета управляющего воздействия.

3.2 Алгоритм адаптивного управления с идентификацией

Синтезируем алгоритм адаптивного управления для объекта произвольной структуры. Считаем, что объект описывается разностным уравнением вида:

$$x(t) = a_1 x(t-1) + a_2 u(t-1) + h(t) \tag{3.3}$$

$h(*)$ – неизвестное внешнее воздействие на объект. На основе уравнения объекта (3.3) формируем динамическую модель в виде разностного динамического уравнения:

$$y(k) = \alpha_1(t)x(k-1) + \alpha_2(t)u(k-1) \tag{3.4}$$

Исходными экспериментальными данными о входе и выходе являются:

$$x(t); x(t-1), u(t-1); x(t-2), u(t-2); \ldots \tag{3.5}$$

Данные представляют последнее измерение выхода объекта и предыдущие синхронные измерения входа и выхода объекта. Параметры $\alpha(t)$ поступают из идентификатора, где они рассчитываются по одному из рассмотренных алгоритмов идентификации.

Расчет управления по модели (3.4) осуществляет прогноз на такт вперед $y(t+1)$ и из локального квадратичного критерия оптимальности:

$$I(u) = \big(y(t+1) - x^*(t+1)\big)^2 = min, \text{ где } u_1 \le u(t) \le u_2 \tag{3.6}$$

В итоге находим оптимальное управление:

$$u(t) = \begin{cases} u_1,\ v(t) \le u_1 \\ v(t),\ u_1 \le v(t) \le u_2, \\ u_2,\ u_2 \le v(t) \end{cases} \tag{3.7}$$

где $v(t) = \alpha_2^{-1}(t)\big(x^*(t+1) - \alpha_1(t)x(t)\big)$.

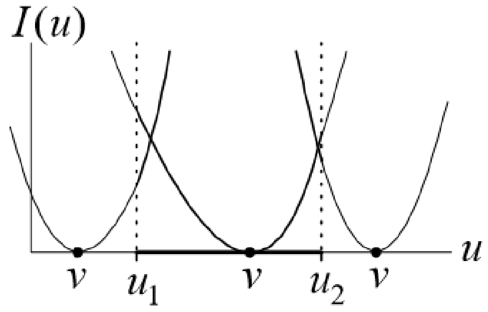

Рисунок 3.2 – Пределы нахождения оптимального управления

Условие нахождения оптимального управления следующее (3.7). При нахождении управляющего воздействия v мы смотрим – входит ли данное воздействие в пределы u1 и u2 (ограничения управляющего воздействия). Если u1 будет больше v, то оптимальным управлением берется u1. Если v будет больше u2, то оптимальным управлением берется u2. Если же v стоит между u1 и u2, то оптимальное управление приравнивают к управляющему воздействию. Данные действия происходят на каждой итерации. Пределы нахождения v представлены на рисунке 3.2.

3.2.1 Алгоритм адаптивного управления для объекта с чистым запаздыванием

Рассматриваем объект, описываемый разностным уравнением

$$x(t) = f(x(t-1), u(t-1-\tau), a) + e(t), \quad t = 1, 2, ... \tag{3.8}$$

Здесь a – вектор неизвестных параметров, e(t) – белый шум, τ – чистое запаздывание на t тактов по каналу " вход-выход". Цель управления остается прежней: обеспечить движение системы по назначенной траектории. Строим модель объекта

$$y(k \mid \alpha(t)) = f(x(k-1), u(k-1-\tau), \alpha(t)). \tag{3.9}$$

При идентификации параметров α(t) индекс времени k в модели может принимать значения t, t – 1, …. Для расчета управляющего воздействия u(t) осуществляем по модели (3.9) прогнозирование выхода объекта на момент времени t + 1 + τ (при этом выход модели будет зависеть от искомого управления u(t):

$$\begin{aligned}
&y(t+1 \mid \alpha(t)) = f(x(t), u(t-\tau), \alpha(t)),\\
&y(t+2 \mid \alpha(t)) = f(y(t+1 \mid \alpha(t)), u(t+1-\tau), \alpha(t)),\\
&\qquad\qquad\qquad \dots\\
&y(t+\tau \mid \alpha(t)) = f(y(t+\tau-1 \mid \alpha(t)), u(t-1), \alpha(t)),\\
&y(t+1+\tau \mid \alpha(t)) = f(y(t+\tau \mid \alpha(t)), u(t), \alpha(t)).
\end{aligned} \tag{3.10}$$

В правую часть уравнения модели, начиная с момента t + 2, входят вместо неизвестных выходов объекта x (t + 1), x (t + 2), … соответствующие им выходы модели y (t + 1| a(t)), y (t + 2| a(t)), …. Уравнения (3.10) решаем последовательно. Выход модели в момент (t + 1 + τ) зависит от искомого управления u(t). Его находим из критерия наименьших квадратов:

$$I(u) = (y(t+1+\tau \mid \alpha(t)) - x^*(t+1+\tau))^2 = \min_{u_1 \le u(t) \le u_2} \tag{3.11}$$

Решение получается в форме (3.7) (если u(t) имеет один минимум внутри допустимой области):

$$u(t) = \begin{cases} u_1, & \text{если } v(t) \le u_1, \\ v(t), & \text{если } u_1 \le v(t) \le u_2, \\ u_2, & \text{если } u_2 \le v(t), \end{cases} \tag{3.12}$$

где идеальное управление v(t) вычисляем из решения уравнения

$$\begin{aligned}
&y(t+1+\tau \mid \alpha(t)) = x^*(t+1+\tau)\\
&f(y(t+\tau \mid \alpha(t)), v(t), \alpha(t)) = x^*(t+1+\tau).
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Формальное решение уравнения (3.13) записываем в виде

$$v(t) = f^{-1}(y(t+\tau \mid \alpha(t)), x^*(t+1+\tau), \alpha(t)). \tag{3.14}$$

Глава 4. Описание программной реализации

Реализация программного комплекса адаптивного управления с идентификацией позволяет осуществить достаточно эффективное управление малоизученными объектами, для которых не были известны ни структура, ни параметры их моделей.

Перед началом разработки программного продукта было проведено исследование предметной области.

Были изучены основные принципы расчета адаптивного управления с идентификацией.

Изучены основные алгоритмы идентификации и проведены исследования с различными входными моделями.

4.1 Аппаратная платформа

Для запуска программного комплекса необходимо, чтобы ваша система подходила под следующие требования:

1. Windows 7 или новее;
2. 512 Мбайт ОЗУ;
3. Процессор Intel или AMD;
4. Дискретная/ встроенная видеокарта с 1 Гбайт DDR3/GDDR5;
5. 10 Мбайт пространства на HDD.

4.2 Обоснование выбора средства разработки

Для разработки программного комплекса был выбран язык программирования C#:

1. Расширяемость системы. В C# можно подгружать любые файлы .exe, импортировать классы и объекты из других программ;

2. Легкость разработки и сопровождения. Читаемость кода на высоком уровне, также присутствует хорошая документированность языка;

3. Большая степень открытости исходных текстов библиотек, исполняемых программ, огромное количество литературы и технической помощи (MSDN и другие источники);

4. Есть также возможность привлечения сторонних разработчиков при разработке системы для программирования узкоспециализированных задач;

5. Высокая скорость работы при распределении процессов. Высокая скорость работы с данными;

6. Удобство разработки во всевозможных средах разработки.

4.3 Используемые программные инструменты

Программный комплекс адаптивного управления был написан в среде разработки Visual Studio 2017 с использованием библиотек математических вычислений mxParser и генератора псевдослучайных чисел “Вихрь Мерсенна”, первая библиотека отвечает за расчет параметров объекта, построение адекватной модели, отвечает за расчет управления, вторая отвечает за формирования псевдослучайных чисел при формировании помехи. Для хранения промежуточных данных была использована БД MySql версии 5.7. Промежуточные данные включают в себя:

1. Параметры альфа;
2. Параметры объекта (значение выхода объекта, вид объекта);
3. Параметры модели (значение выхода модели, вид модели);
4. Параметры управляющего воздействия;
5. Параметры оптимального управления;
6. Основные параметры, который выбирает пользователь на форме формирования задачи;
7. Шаг выполнения задачи.

4.4 Требования к программному комплексу

Программная реализация комплекса адаптивного управления должна выполнять следующие функции:

- добавление задач управления;
- запись в БД всех необходимых параметров для проведения анализа адаптивного управления;
- формирование адекватной модели по заданному объекту исследования;
- расчет оптимального управления в соответствии с выбранными параметрами исследования;
- вывод графика изменения управляющего воздействия/ оптимального управления за единицу времени;
- вывод результирующих графиков выхода объекта и желаемой траектории объекта.

4.5 Основные программные компоненты

- Работа с БД
    - подключение к БД, создание/ удаление таблиц, формирование запросов;
- Генерация функции
    - на входе происходит вычисление функции, значение которой необходимо для дальнейшего вычисления оптимального управления;
- Генерация модели
    - на основе данных объекта происходит построение модели. Далее происходит подсчет значения модели, которое также необходимо для дальнейших расчетов;
- Работа с входными параметрами
    - в данном компоненте происходит генерация новых значений параметров объекта и модели на новой итерации;

- Подсчет параметров альфа модели
  - вычисление параметров альфа модели. Необходим для дальнейшего вычисления оптимального управления;
- Вычисление оптимального управления
  - происходит вычисление управляющего воздействия, которое проверяется на адекватность. Оптимальное управление строится на адекватности управляющего воздействия;
- Графический компонент
  - в данном компоненте происходит графическое представление полученных результатов.

4.6 Алгоритм проведения исследования

Первым делом до начала исследований необходимо:

1. Выбрать задачу из числа тех, что сохранены в БД. Если в списке задач нет сохраненных, то необходимо добавить задачу в список исследуемых задач:

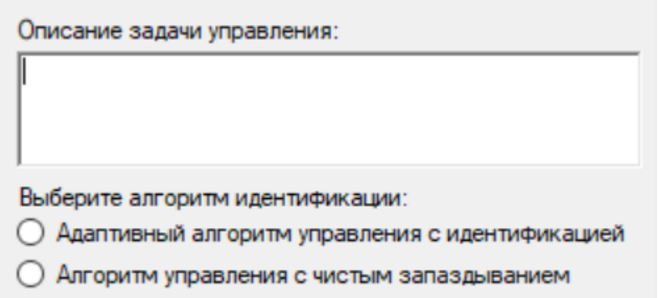

Рисунок 4.1 – Описание задачи управления и выбор исследуемого алгоритма

2. Если при выборе задачи данные были сохранены в БД, то все параметры для простоты будут выведены на форме программы, чтобы повторно не вводить все параметры объекта, модели, исследуемой задачи. Если же задача была вновь создана, то необходимо вписать объект исследования, параметры объекта, после чего нажать на кнопку “Далее”:

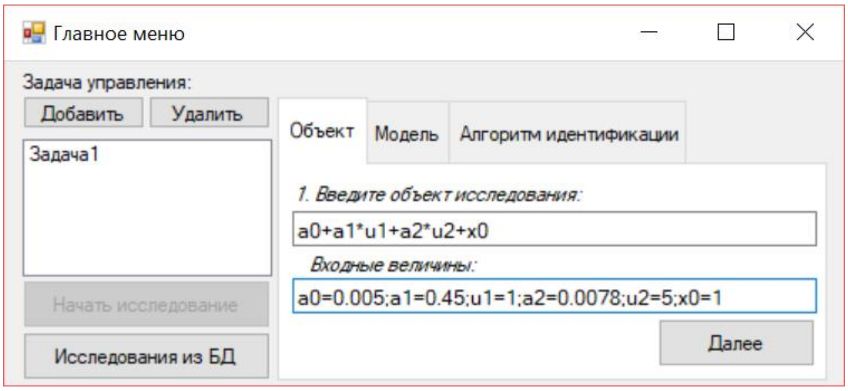

Рисунок 4.2 – Ввод объекта исследования и входных величин

3. После этого программа генерирует модель объекта, которая также проверяется на адекватность. Также вместе с моделью объекта выводится значение модели. При нажатии на кнопку “Далее” вы попадаете на вкладку, где будет показан алгоритм идентификации, который был выбран для исследования:

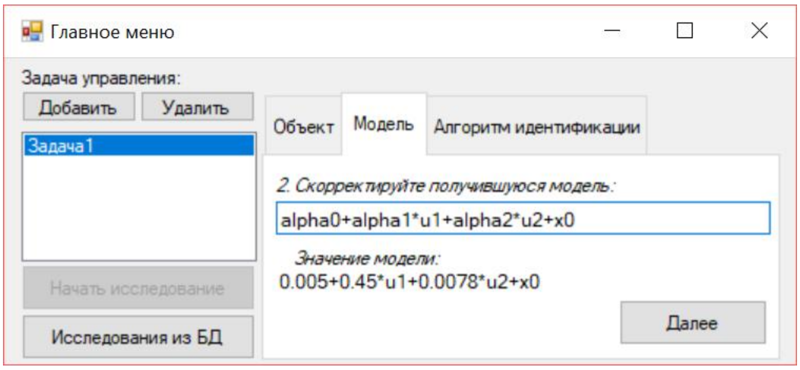

Рисунок 4.3 – Модель и значение модели исследования

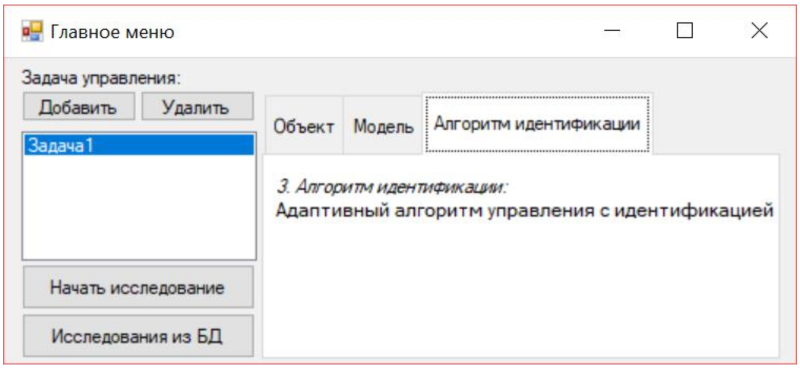

Рисунок 4.4 – Алгоритм идентификации

4. При нажатии на кнопку “Начать” мы попадаем на форму формирования параметров исследования, где мы вводим ограничения управляющего воздействия, помеху, использование сглаживания, начало графика, шаг выполнения алгоритма, а также желаемое значение x*, по которому происходит исследование. Желаемое значение x* также можно менять в ходе итераций. Это показано на рисунке 4.6. По желаемому значению x* в ходе выполнения исследования мы понимаем – алгоритм рассчитывает оптимальное управление верно или нет – выход объекта к конечной итерации должен приближаться к желаемому значению x* (сначала вводится начальное значение x*, далее, через точку с запятой, производится запись номера итерации и значения x*):

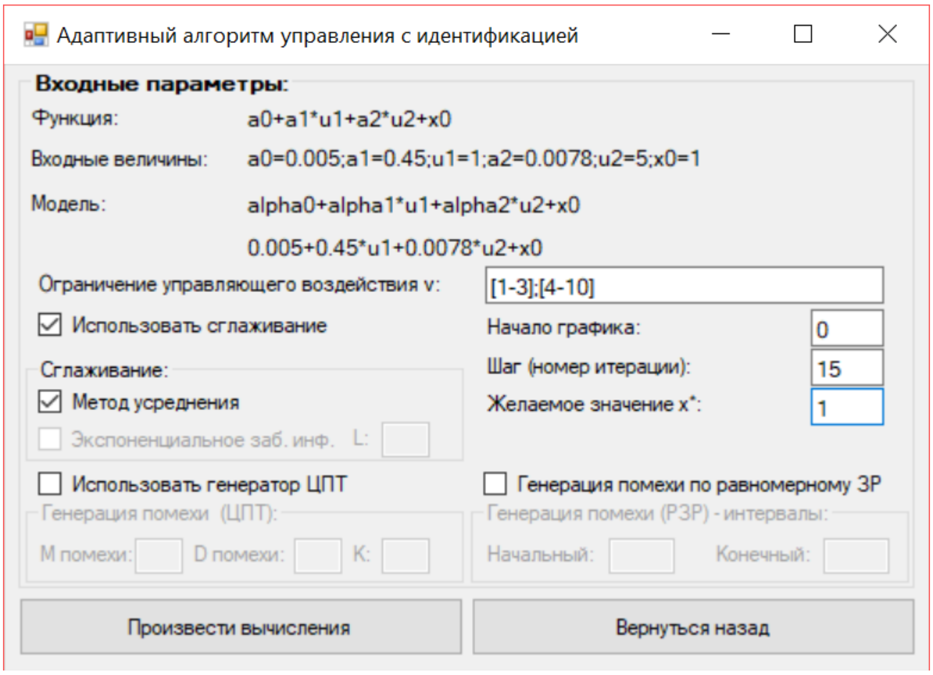

Рисунок 4.5 – Параметры исследования

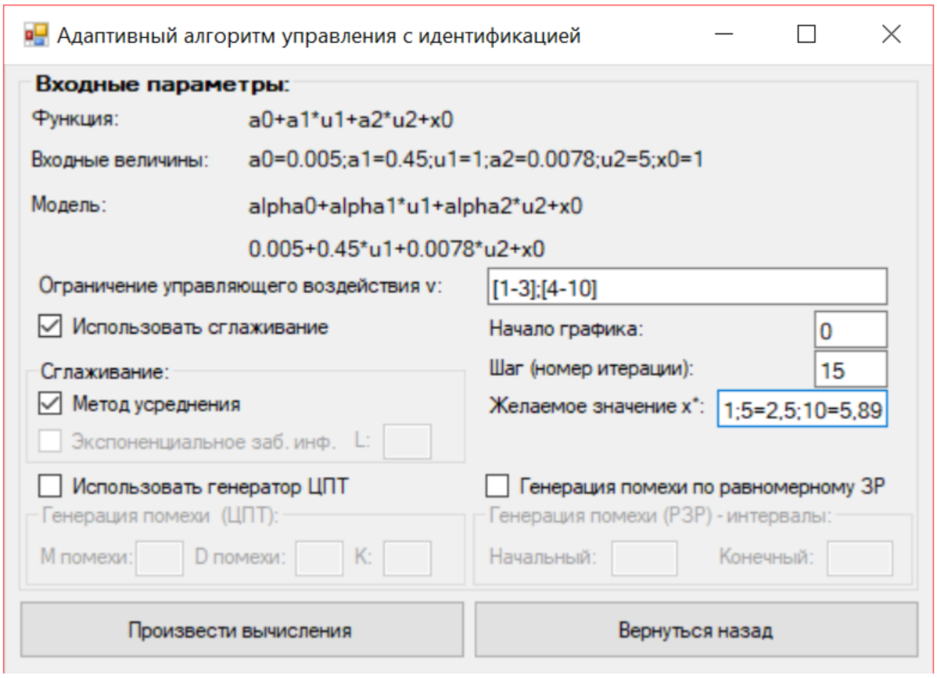

Рисунок 4.6 – Пример ввода изменения желаемого значения x* на итерациях

Также при адаптивном управлении с чистым запаздыванием должен учитываться такт запаздывания. В программном комплексе данный пункт появляется при использовании алгоритма с чистым запаздыванием. На рисунке 4.7 приведен пример ввода такта запаздывания (сначала вводится общий такт запаздывания, далее, через точку с запятой, для каждой из переменных):

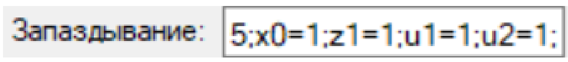

Рисунок 4.7 – Пример ввода такта запаздывания

5. После выполнения вычислительной части комплекса мы попадаем на форму исследования оптимального управления, выхода значений объекта, а также просмотра всех параметров на каждой пройденной итерации. На первом графике происходит отрисовка оптимального управления (одного или нескольких), на втором же происходит графическое сравнение значения желаемого значения x* с выходом объекта на всех итерациях:

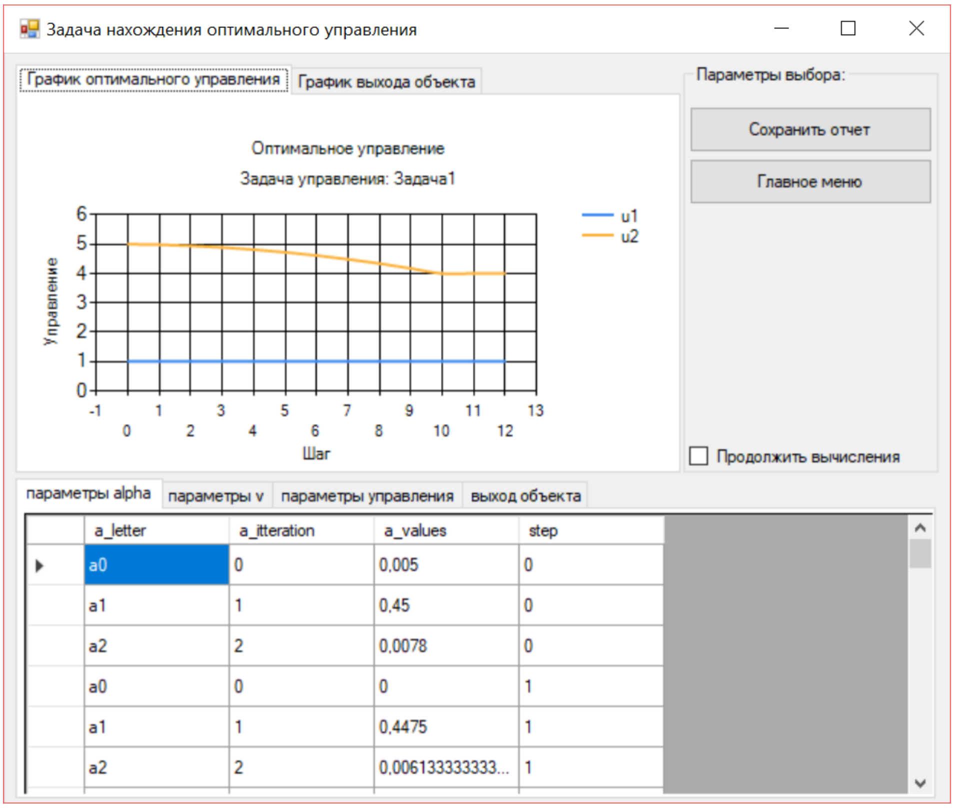

Рисунок 4.8 – Графический вывод задачи оптимального управления

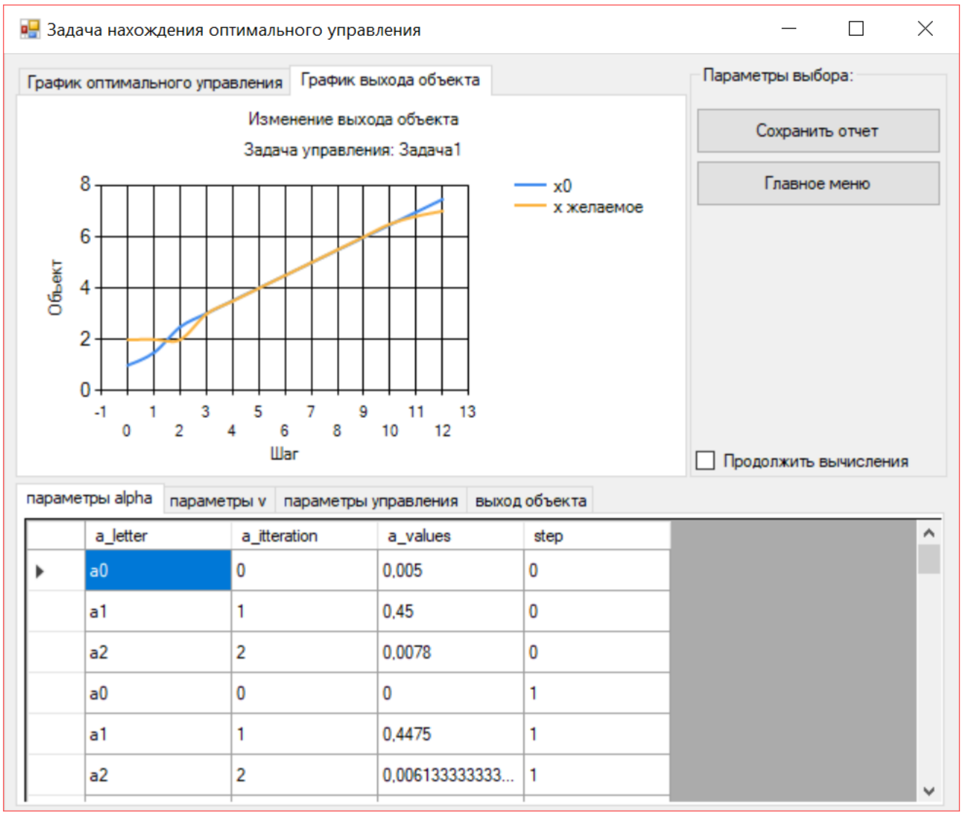

Рисунок 4.9 – Графический вывод изменения выхода объекта

6. В итоге выполнения поставленной задачи можно выйти в главное меню для выполнения этого же или другого исследования с формированием других параметров или выполнить формирование отчета по выполненному исследованию. Также есть возможность посмотреть графики задачи, чье оптимальное управление уже было посчитано. Для этого необходимо выбрать задачу и нажать на кнопку “Исследования из БД”:

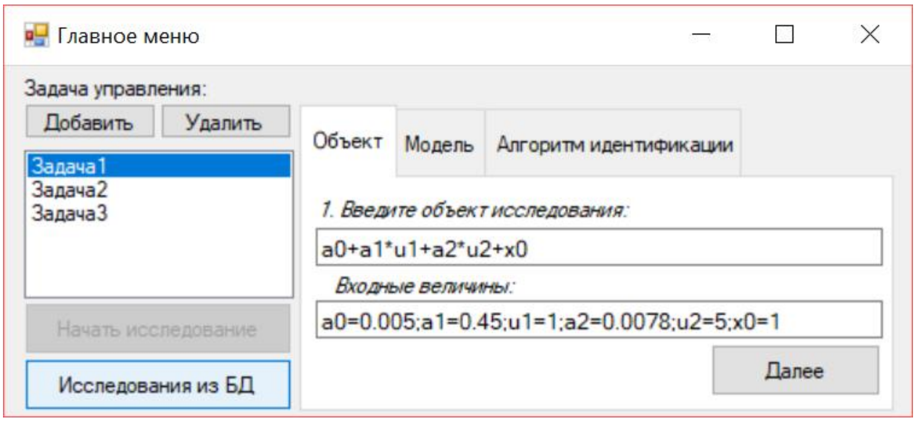

Рисунок 4.10 – Вывод графиков без повторного подсчета оптимального управления

Глава 5. Численные исследования

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были проведены исследования алгоритма адаптивного управления с идентификацией (также с чистым запаздыванием) на предмет адекватности представленных моделей, точности управления, скорости выполнения поставленной задачи, зависимости использования помехи от точности исследования. Ниже представлены следующие исследования, доказывающие правильную работу программного комплекса:

1. Для выполнения исследования (без чистого запаздывания) был представлен следующий объект:

$$x(t) = a0(t) + a1(t) * x0(t) + a2(t) * u1(t) + \ldots$$

$$\ldots + a3(t) * u2(t) + a4(t) * z1(t) + a5(t) * z2(t)\,. \qquad (5.1)$$

Входные величины были представлены следующими:

Таблица 5.1 – Входные величины задачи исследования

a0=0.0126	u1=4	z1=200;	x0=0.75
a1=0.07572	u2=60	z2=75	
a2=0.00359			
a3=0.01113			
a4=0.000496			
a5=0.00030912			

Далее происходит формирование модели и проверка самой модели на адекватность для корректного выполнения поставленной задачи:

$$y(k \mid a(t)) = \alpha0(k) + \alpha1(k) * x0(k) + \alpha2(t) * u1(t) + \cdots$$

$$\ldots + \alpha3(t) * u2(t) + \alpha4(t) * z1(t) + \alpha5(t) * z2(t)\,. \qquad (5.2)$$

Формирование модели происходит следующим образом: параметры a объекта (5.1) заменяются на соответствующие параметры alpha, в остальном же модель полностью соответствует объекту. Так же при формировании модели происходит отсечение белого шума, так как модель должна быть идеальной. Так как исследования проводились на динамических моделях, мы вводим коэффициент t – счетчик шага на каждой итерации выполнения вычислений.

Также в программном комплексе есть возможность посмотреть значение модели.

Для данной задачи были выбраны следующие параметры:

1. Выбрано ограничение управляющего воздействия – [1-7]; [40-100];
2. Использованное сглаживание – метод усреднения;
3. Начало графика выбрано на 0;
4. Шаг (номер итерации) равно 12;
5. Желаемое значение выхода объекта стремится к 1.

Исследование оптимального управления:

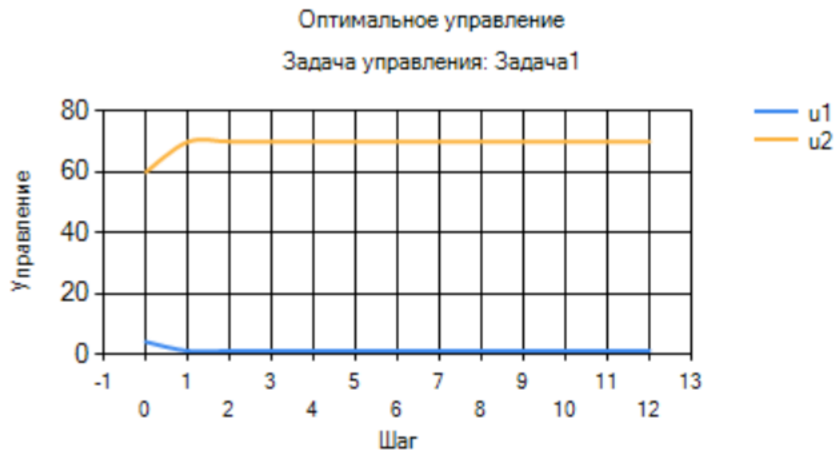

Рисунок 5.1 – Оптимальное управление u1 и u2

В ходе выполнения исследования мы видим, что управление стремиться к своему истинному значению. Оптимальное управление выбрано верно и равно u1 = 1, а u2 = 70. Управление хорошее, соответствует поставленной задаче.

Далее необходимо исследовать стремление выхода объекта к своему истинному значению:

Рисунок 5.2 – Изменение выхода объекта

Итогом выполнения алгоритма мы пришли к выводу, что выход объекта стремиться к желаемому значению x*, что и требовалось исследовать. Выход объекта в ходе 12 итераций выравнивается к своему истинному значению.

Далее мы повторяем поставленную задачу, но при этом добавляем помеху по равномерному закону распределения, значение которой находится в интервале от -0,15 до 0,15. Ниже представлен результат работы программы:

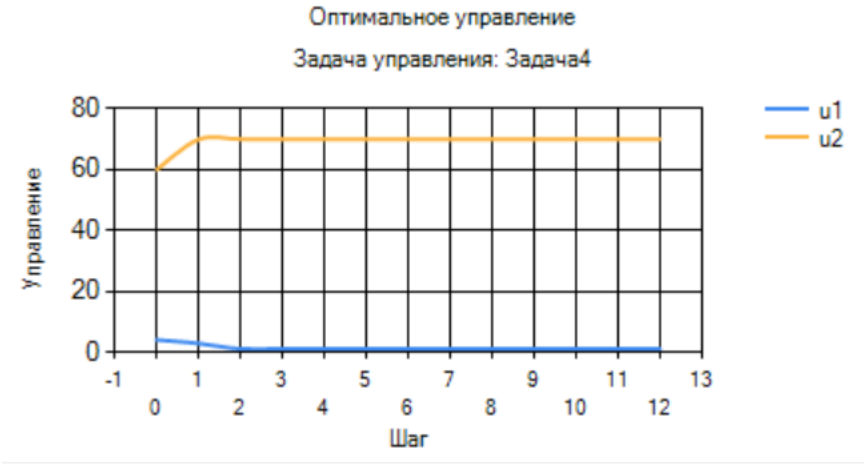

Рисунок 5.3 – Оптимальное управление u1 и u2 при добавлении помехи

Рисунок 5.4 – Изменение выхода объекта при добавлении помехи

Как мы видим, при добавлении помехи оптимальное управление остается на таком же уровне, что и до добавления. График изменения выхода объекта с добавлением помехи хоть и становится синусоидальной формы, но также стремиться к желаемому значению x.

Во втором пункте проведены исследования с использованием алгоритма при чистом запаздывании. Примером такой задачи может служить исследование температурных режимом жидких сред [9]. Ниже представлено исследование при использовании алгоритма адаптивного управления с чистым запаздыванием:

2. Для выполнения исследования с чистым запаздыванием был представлен следующий объект:

$$x(t) = a0 + a1 * x(k - 1) + a2 * x(k - 2) + \ldots$$

$$\ldots + a3 * u(k - 1 - \tau) + a4 * u(k - 2 - \tau) - e(t) . \quad (5.3)$$

Входные величины были представлены следующими:

Таблица 5.2 – Входные величины задачи исследования

a0=0.0045	u1=2	x0=0.15
a1=0.125	u2=15	x1=0.89
a2=0.45		
a3=1.89		
a4=0.76		

Далее происходит формирование модели и проверка самой модели на адекватность для корректного выполнения поставленной задачи:

$$y(k \mid a(t)) = a0(k) + a1(k) * x(k - 1) + a2(k) * x(k - 2) + a3(k) *$$
$$\ldots + u(k - 1 - \tau) + a4 * u(k - 2 - \tau) . \quad (5.4)$$

Формирование модели происходит таким же способом, что и в первом исследовании. Суть алгоритма с чистым запаздыванием в следующем: происходит прогноз выхода объекта, параметров объекта, а также управления на определенное количество тактов вперед. Цель управления остается прежней: обеспечить движение системы по назначенной траектории.

Для данной задачи были выбраны следующие параметры:

1. Выбрано ограничение управляющего воздействия – [1,56-10,9]; [11-20,45];
2. Использованное сглаживание – метод усреднения;

3. Начало графика выбрано на 0;

4. Шаг (номер итерации) равно 50;

5. Желаемое значение выхода объекта стремится к 20 на начальной итерации; на 10 итерации = 80; на 30 итерации = 30; на 40 итерации = 30; на 42 итерации = 10; на 48 итерации = 10;

6. Запаздывание равно 5; для x1 = 1; для u1 = 5; для u2 = 6.

Исследование оптимального управления (без использования помехи):

Рисунок 5.5 – Оптимальное управление u1 и u2

В ходе выполнения исследования мы также видим, что управление стремиться к своему истинному значению. Оптимальное управление выбрано верно и показано на Рисунке 5.5. Управление хорошее, соответствует поставленной задаче.

Далее необходимо исследовать стремление выхода объекта к своему истинному значению:

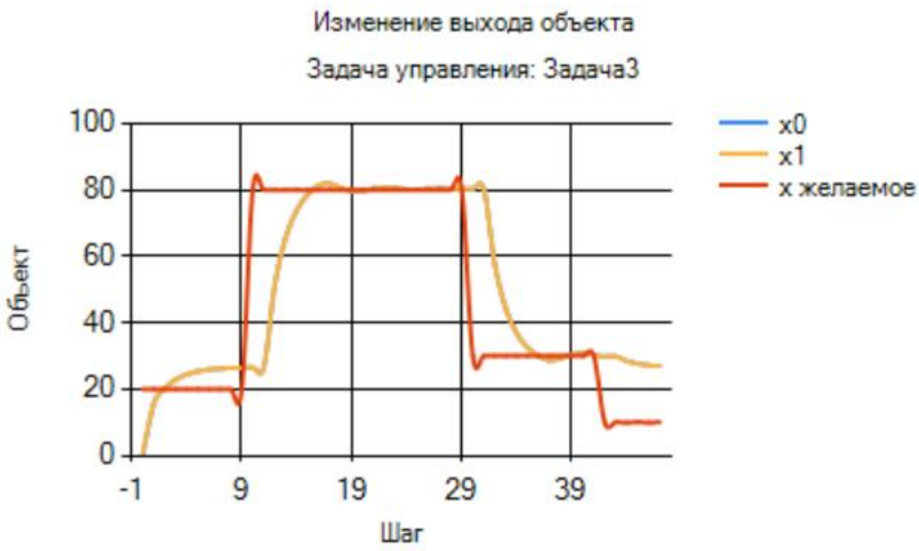

Рисунок 5.6 – Изменение выхода объекта

Итогом выполнения алгоритма с чистым запаздыванием мы пришли к выводу, что выход объекта стремиться к желаемому значению x*, что и требовалось исследовать. Выход объекта в ходе 50 итераций стремится к своему истинному значению.

Далее мы повторяем поставленное исследование, но при этом добавляем помеху по равномерному закону распределения, значение которой находится в интервале от -0,15 до 0,15. Ниже представлен результат работы программы:

Рисунок 5.7 – Оптимальное управление u1 и u2 при добавлении помехи

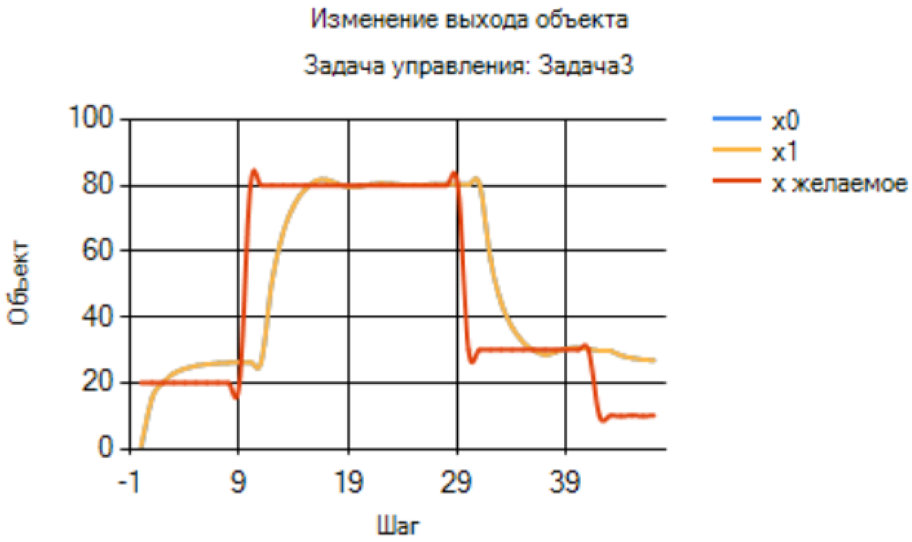

Рисунок 5.8 – Изменение выхода объекта при добавлении помехи

Как мы видим, при добавлении помехи оптимальное управление с чистым запаздыванием остается на таком же уровне, что и до добавления. График изменения выхода объекта с добавлением помехи стремиться к желаемому значению x и почти не повлиял на его значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные системы управления разрабатываются, в конечном итоге, для производственных процессов, являющихся сложными многоэлементными системами. Если не вникать в саму внутреннюю структуру исследуемого объекта, а моделировать связь между его входным и выходным процессами, то это приводит к значительному упрощению модели. Задача идентификации объектов составляет один из основных этапов создания систем управления и принятия решений.

Адаптивная система управления обеспечивает высокую работоспособность в условиях изменения свойств управляемого объекта, окружающей среды и целей, за счет разработки новых алгоритмов функционирования.

Результатом выполнения выпускной квалификационной работы является программное обеспечение, которое может проводить исследования в области расчета адаптивного управления с алгоритмом идентификации.

В процессе реализации программного комплекса выяснилось также, что данный алгоритм работы можно применять для широкого спектра объектов различной природы. Это обстоятельство позволяет решать задачу автоматизированного проектирования математического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саридис Дж., Самоорганизующиеся стохастические системы управления. - М.: Наука, 1980. - 400 с.

2. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С.М. Ермакова. - М.: Наука, 1983. - 392 с.

3. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л., Избранные главы теории автоматического управления с примерами в системе MatLab. - СПб.: Наука, 1999 - 467 с.

4. Гарднер М.Ф., Бэрнс Дж.Л., Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными постоянными. - 3-е изд., испр. - М.: Физматгиз, 1961. - 551 с.

5. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы: Учебное пособие для вузов. - СПб.: Питер, 2005. - 336 с.

6. Евдокимов И.В., Процедура идентификации как этап создания систем управления и принятия решений. Проблемы социально-экономического развития Сибири, 2012. № 4. 130 с.

7. Рубан А.И., Методы анализа данных: Учебн. пос.: В 2 ч. Красноярск: КГТУ, 1994. Ч.2. 125 с.

8. Математика и кибернетика в экономике: словарь-справочник. – М.: Экономика, 1975.

9. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. М.: Мир, 1984. 541 с.